

DOI: 10.20103/j.stxb.202208152348

王栋, 邹维娜, 杨华蕾, 李阳, 刘君恬, 田丰, 李秀珍, 袁琳. 长江口崇明岛周缘盐沼湿地土壤碳储量的空间格局. 生态学报, 2023, 43(20): 8465-8475.

Wang D, Zou W N, Yang H L, Li Y, Liu J T, Tian F, Li X Z, Yuan L. Spatial pattern of soil carbon storage in salt marsh wetlands around the Chongming Island in the Yangtze River Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8465-8475.

长江口崇明岛周缘盐沼湿地土壤碳储量的空间格局

王 栋¹, 邹维娜², 杨华蕾¹, 李 阳¹, 刘君恬¹, 田 丰¹, 李秀珍^{1,3}, 袁 琳^{1,3,*}

1 华东师范大学, 河口海岸学国家重点实验室, 崇明生态研究院, 蓝碳科学与技术研究中心, 上海 200241

2 上海应用技术大学生态技术与工程学院, 上海 201418

3 长江三角洲河口湿地生态系统教育部/上海市野外科学观测研究站, 上海 202162

摘要: 盐沼湿地在缓解温室效应和应对气候变化方面发挥着重要作用, 是重要的“蓝碳”生态系统。储存在盐沼湿地土壤中的有机碳(SOC)是盐沼湿地碳汇的主要成分, 但受植被覆盖、土壤环境等生境要素变化的显著影响。以长江口崇明岛周缘的盐沼湿地为典型研究区域, 分别测量了环岛不同样线和不同植被区 SOC 含量及环境因子(盐度、容重、碳氮比(C/N)等), 在此基础上分析了盐沼湿地 SOC 储量的空间分布格局及其影响因素。结果表明: (1) 崇明岛周缘盐沼湿地 SOC 含量和储量均存在明显的空间异质性, 北侧的土壤 SOC 含量高于南侧, 东北侧的 SOC 储量高于西南侧区域; (2) 垂直各层上, SOC 含量呈现随土层深度增加逐渐减少的趋势, 表层 0—50 cm 深度的单位面积 SOC 储量大于 50—100 cm 深度; (3) 植物类型和土壤理化因素(土壤 C/N、土壤盐度、土壤容重等)在一定程度上影响了崇明岛周缘盐沼湿地土壤碳储量的空间格局。研究表明, 受河口区植被和土壤理化性质等多种因素空间异质性的共同影响, 盐沼湿地土壤 SOC 储量格局也易呈现空间差异, 因此在开展盐沼湿地储碳机制研究、科学评估盐沼湿地储碳能力及实现盐沼“蓝碳”固碳增汇时应充分考虑区域间的环境和生态的空间异质性特征。

关键词: 盐沼湿地; 碳储量; 河口; 土壤有机碳; 空间格局

Spatial pattern of soil carbon storage in salt marsh wetlands around the Chongming Island in the Yangtze River Estuary

WANG Dong¹, ZOU Weina², YANG Hualei¹, LI Yang¹, LIU Juntian¹, TIAN Feng¹, LI Xiuzhen^{1,3}, YUAN Lin^{1,3,*}

1 Center for Blue Carbon Science and Technology, Institute of Eco-Chongming, State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2 School of Ecological Technology and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

3 Yangtze Delta Estuarine Wetland Ecosystem Observation and Research Station (Ministry of Education & Shanghai Science and Technology Committee), Shanghai 202162, China

Abstract: Salt marsh wetlands are regarded as important blue carbon ecosystems, which play important roles in mitigating the greenhouse effects and resist global climate change. Organic carbon stored in the soil (soil organic carbon, SOC) is the main component of the carbon sink in salt marsh wetlands, but its storage is susceptible to various environmental factors. The changes of environment factors, such as vegetation coverage and soil physicochemical factors, could significantly affect the SOC storage capacity of salt marsh wetlands and change the spatial distribution of soil carbon storage, especially in estuarine area where there are obvious spatial and temporal differences in environment. Based on the salt marsh wetlands

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2243207, 42141016); 上海市科委项目(22dz1202700, 21DZ1201803)

收稿日期: 2022-08-15; **采用日期:** 2023-02-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyuan@sklec.ecnu.edu.cn

around the Chongming Island in the Yangtze Estuary as a typical study area, the SOC content of different line transects and different vegetation types along the elevation change from sea to land were measured around the island, and the physicochemical properties of plants and soil (salinity, bulk density, C/N ratio, etc.) at each sampling point were monitored simultaneously. Besides, the spatial distribution pattern of SOC storage in the salt marsh wetland around the Chongming Island and its influencing factors were analyzed. The results showed that: (1) there was significantly spatial heterogeneity in the SOC content and storage in the salt marsh wetland around the Chongming Island, with higher SOC content on the north side and higher SOC storage on the northeast side. (2) on the vertical soil layers, the SOC content showed a decreasing trend with the increase of soil depth, and the SOC storage per unit area at 0—50 cm depth was higher than that at 50—100 cm depth. (3) plant types and soil physicochemical factors (soil C/N, soil salinity, soil bulk density, etc.) regulated and interacted with each other, which affected the spatial pattern of the SOC storage in the salt marsh wetlands around the Chongming Island to some extent. Studies have shown that, due to the spatial heterogeneity of vegetation types and soil physicochemical properties in estuaries, the SOC storage patterns in salt marsh wetlands were also prone to spatial variation. Therefore, the spatial heterogeneity of the environment and ecology between regions should be fully considered when carrying out the investigation of carbon storage, which not only helps to scientifically evaluate the carbon storage capacity of salt marshes, but also will be of great significance to further explore the carbon storage mechanism of salt marshes and implement the carbon sequestration and sink increase of blue carbon in the salt marshes.

Key Words: salt marsh wetlands; carbon storage; estuary; soil organic carbon; spatial pattern

在全球气候变化和人类活动的共同影响下,大气中二氧化碳(CO_2)持续增加,导致 2020 年全球平均温度比工业化前水平高出了 1.2°C ^[1],如果不采取积极的固碳减排行动,全球的 1.5°C 温控目标将难以实现^[2]。面对气候变化的严峻形式,我国政府也提出了争取实现碳达峰和碳中和的“3060”双碳目标。除了减少碳排放外,增加生态系统的碳封存能力是缓解大气中 CO_2 浓度过多的重要措施之一^[3]。其中,土壤有机碳库约占全球土壤总碳库的三分之二,且与大气有着密切的碳交换^[4],它是大气碳库(760 Gt)的 3.3 倍,是生物碳库(560 Gt)的 4.5 倍^[5],在封存大气 CO_2 方面起着重要作用。因此,土壤有机碳(SOC)储存对调节碳循环和缓解全球气候变化具有重要意义。

盐沼湿地位于陆海过渡区,由于其特殊的地理位置和特殊的水文条件,使其具有较高的初级生产力、沉积率和碳埋藏率等特点^[6],与红树林和海草床一起被称为海洋蓝碳生态系统^[7]。在我国,盐沼湿地是滨海湿地中面积最大的蓝碳生态系统类型,在增加碳汇和调节气候变化等方面具有重要价值^[8]。研究表明,约有 50%—90% 的碳储存在蓝碳生态系统的土壤中^[9],其中 SOC 不仅是湿地土壤的重要组成部分,还是盐沼湿地碳汇的主要成分。目前,国内外已有不少关于盐沼湿地碳储量的研究,这些研究多利用野外采样、碳通量监测及模型反演等方法对某个区域开展碳储量的定量评估^[9—10],或者通过控制实验和野外监测,分析水位、盐度、氮沉降等因子变化对土壤碳储量或碳组分的影响^[11—12],从区域尺度上分析盐沼湿地 SOC 储量的空间格局及其影响因素尚有待进一步深入。从已有的研究来看,SOC 储量受植被覆盖、水文、土壤理化性质等多个因素的共同影响^[13—14]。盐沼湿地位于陆海交互区,盐沼植被类型、环境因子及 SOC 储量等常常具有显著的空间异质性特征,因此探明盐沼湿地 SOC 储量的空间分布,分析盐沼植被类型、土壤理化因子对碳储量空间格局的影响,对于深入理解盐沼湿地储碳机制、科学进行碳储量评估、开展生态修复和管理工作具有重要意义。

长江口湿地是世界上最大的滨海湿地之一,崇明岛周缘的盐沼湿地也是长江口面积最大、发育最完善的盐沼湿地,在区域微气候调节中扮演着重要角色^[15]。崇明岛是典型的東西狭长型河口冲积岛屿,盐淡水交汇,受径潮流和波浪影响较大,其周缘盐沼湿地表层盐度、沉积物含水量和类型、植被类型等在空间上分异显著^[16],因而崇明岛周缘盐沼湿地 SOC 储量可能有很大空间变异性。本研究以崇明岛周缘盐沼湿地为研究区域,通过监测环岛不同样线上盐沼植物芦苇(*Phragmites australis*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)和海三棱藨

草(*Bolboschoenoplectus marigueter*)样方的 SOC 含量及环境因素(盐度、容重、碳氮比(C/N)等),探究了崇明岛周缘盐沼湿地 SOC 储量的空间格局及其影响因素,以期深入了解盐沼湿地储碳机制、开展兼顾固碳增汇的盐沼湿地生态修复和推进崇明“碳中和”示范岛提供科学依据,更好地服务我国“碳达峰、碳中和”战略目标。

1 研究地区与方法

1.1 研究区域概况

崇明岛(121°09'—121°54'E, 31°27'—31°51'N)位于我国长江口,是世界上最大的河口冲积岛,也是我国第三大岛^[17]。整个崇明岛呈现东西狭长型的带状分布,长江口自河口感潮区至入海口存在着天然的盐度梯度,因而土壤盐度在空间上呈自西向东递增趋势^[18],受地势、河流径流以及潮汐涨退的影响,其周缘盐沼湿地的沉积物含水量、粒度、容重等也呈现出不同的空间分布特征^[19]。环岛的自然滩涂上主要分布着芦苇、海三棱藨草和互花米草等 3 种主要优势盐沼植物^[20]。芦苇群落在整个崇明岛自然滩涂湿地均有分布,面积最广,是大潮高潮带以上的优势群落;海三棱藨草群落主要分布于中低潮滩^[21];上海崇明东滩鸟类国家级自然保护区实施了 24 km²的“互花米草控制和鸟类栖息地优化工程”的生态治理后,互花米草主要分布在崇明岛北缘芦苇和海三棱藨草群落之间^[22]。

在国家“碳达峰、碳中和”战略下,2022 年上海市将崇明世界级生态岛作为碳中和示范区进行布局,未来将围绕新能源利用、低碳与零碳城乡建设、生态碳汇技术、碳捕集与封存技术等方面开展相关科学研究、技术研发和应用示范,其中湿地生态系统固碳功能保育修复以及滨海湿地增汇技术是崇明碳中和示范岛建设的重要内容。

1.2 样品采集与处理

2021 年 9 月,在野外考察基础上,结合崇明岛周缘盐沼湿地 3 种主要优势植物的分布格局及河口到近海的盐度梯度,环岛布设 10 条调查样线(图 1)。每条样线上,不同植物群落沿高程梯度随机设置三个样方(50 cm×50 cm)作为重复(表 1)。按五点采样法用柱状取样器采集样方内 100 cm 深度处土壤剖面,按 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—100 cm 分层,放入标记好的自封袋密封。野外采回的土样经自然风干、研磨、过筛、酸化处理,待样品中的无机碳反应充分后,用超纯水清洗至中性,烘干(不超过 60℃)后包样,

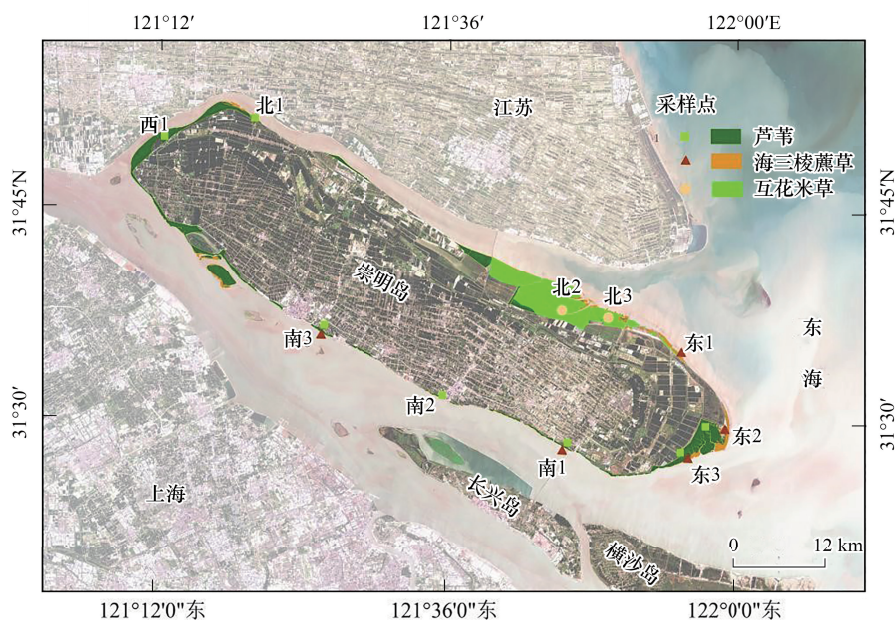


图 1 研究区域及样点分布

Fig.1 Geographical location of the study area and the study sites

用元素分析仪(Elementar,德国)测定 SOC 和土壤总氮(STN)含量^[23]。

表 1 各样线编号及植被类型
Table 1 Line transects and vegetation types

样线编号 Line transects	植被类型 Vegetation types	样线编号 Line transects	植被类型 Vegetation types
北 1 North 1	芦苇	东 3 East 3	芦苇 海三棱藨草
北 2 North 2	互花米草	南 1 South 1	芦苇 海三棱藨草
北 3 North3	互花米草	南 2 South 2	芦苇
东 1 East 1	海三棱藨草	南 3 South 3	芦苇 海三棱藨草
东 2 East 2	芦苇 海三棱藨草	西 1 West 1	芦苇

每个样方内,利用土壤三参仪(WET—2,英国)现场同步测定 0—10 cm 深度的土壤电导率^[24];用便携式土壤 pH 计(SoilStik,Spectrum,美国)测定土壤 pH;用环刀采集相应土层的土壤,后计算获得土壤容重。同时,收割样方内植物地上部分和地下部分,带回实验室后分选出根、叶,冲洗干净,烘干后称量其地上生物量;然后将植物根和叶片用粉碎机将其粉碎、研磨、过 100 目筛,用元素分析仪(Elementar,德国)测定植物叶片和根部有机碳和总氮含量,计算获得 C/N^[25]。

通过土壤容重和 SOC 含量分别计算 0—100 cm 深度的 SOC 储量(式 1 和式 2):

$$SC_{org,i} = \sum_{j=1}^6 SC_j \times BD_j \times D_j \times 10^4 \tag{1}$$

$$SC_{stock} = SC_{org,i} \times S_i \times 10^{-2} \tag{2}$$

式中, $SC_{org,i}$ 分别为 0—100 cm 深度的 SOC 密度(g/m^2), SC_j 分别为第 j 层的平均 SOC 含量(%), BD_j 为第 j 层的容重(g/cm^3), D_j 为第 j 层的厚度(cm); S_i 为所调查分区盐沼植被面积,单位为公顷(hm^2), SC_{stock} 分别为盐沼 SOC 储量,单位为兆克碳(Mg C)。本研究仅计算单位面积 SOC 储量($Mg\ C/hm^2$)。

1.3 数据处理与分析

使用 SPSS 23(SPSS Inc., 芝加哥,美国)和 Origin 2022 统计学软件进行数据统计分析和作图;通过单因素方差分析和图基事后比较法(Tukey's HSD)分析不同样线间 0—10 cm 深度 SOC 含量和环境因素的显著性差异($P < 0.05$);通过 Cannoco 5 软件对盐沼湿地各样线的 0—10 cm 的 SOC 含量和环境因素进行冗余分析;利用 Pearson 相关性分析法分析 SOC 含量与环境因素之间的关系。

2 结果与分析

2.1 崇明岛周缘盐沼湿地 SOC 储量的空间格局

崇明岛周缘盐沼湿地不同样线 SOC 含量和单位面积 SOC 储量呈现明显的空间差异(图 2)。整体上,崇明岛周缘盐沼湿地北侧样线的 SOC 含量高于南侧样线。北 3 样线 SOC 含量(0—100 cm)平均值最高((13.2 ± 4.4) g/kg),东 3 样线 SOC 含量(0—100 cm)平均值最低((2.1 ± 0.3) g/kg)(图 2)。从不同土层深度的 SOC 含量来看,除南 1 和西 1 样线外,各样线 SOC 含量整体呈现随土层深度增加而逐渐减少的趋势(图 2)。0—10 cm 土层的平均 SOC 含量最高((8.2 ± 5.7) g/kg)且样线间差异显著($P < 0.05$),50—100 cm 土层的平均 SOC 含量最低((6.1 ± 2.5) g/kg)。

对于 SOC 储量而言,崇明岛周缘盐沼湿地东北侧的单位面积 SOC 储量高于西南侧。无论芦苇群落还是海三棱藨草群落,单位面积 SOC 储量最高值均在崇明岛东北侧,芦苇群落为北 1 样线((79.56 ± 6.3) $Mg\ C/hm^2$),海三棱藨草群落为东 1 样线((86.07 ± 2.06) $Mg\ C/hm^2$)(图 2)。互花米草群落仅分布在崇明岛北沿,不同样线间单位面积 SOC 储量无显著差异(北 2 为(82.8 ± 2.53) $Mg\ C/hm^2$,北 3 为(82.23 ± 5.3) $Mg\ C/hm^2$)($P >$

0.05,图2)。各样线在0—50 cm 单位面积内平均 SOC 储量 ($(32.9 \pm 11.6) \text{ Mg C/hm}^2$) 高于 50—100 cm 深度 ($(29.7 \pm 9.5) \text{ Mg C/hm}^2$), 芦苇群落、互花米草群落和海三棱藨草群落 0—50 cm 土壤的单位面积内平均 SOC 储量分别约占 0—100 cm 深度的 56.4%、55.4%和 49%。

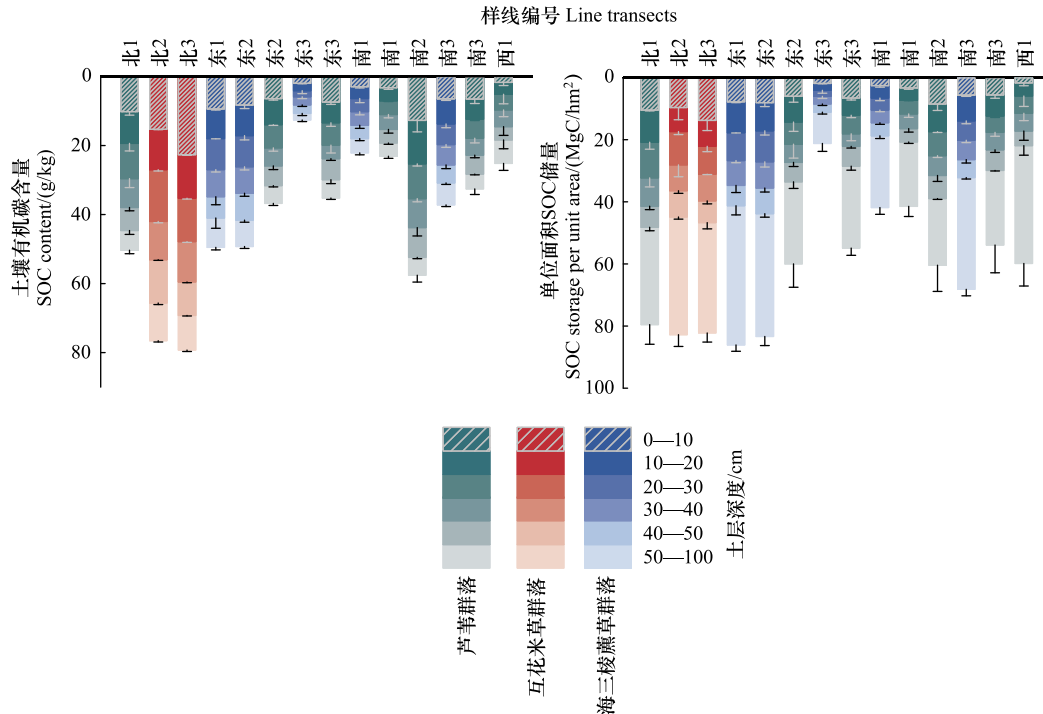


图2 崇明岛周缘盐沼湿地的 SOC 含量变化和单位面积 SOC 储量

Fig.2 Changes of SOC content and SOC storage per unit area in salt marshes around Chongming Island

SOC: 土壤有机碳 soil organic carbon

从冗余分析结果可以看出,崇明岛周缘盐沼湿地不同样线植被类型和土壤理化特征的解釋度为 72.23% (图3),土壤盐度、土壤 C/N 和土壤容重对 SOC 含量和单位面积 SOC 储量的累计贡献率达 93.5%,互花米草群落明显区别于与芦苇和海三棱藨草群落。

2.2 植被类型对 SOC 含量及单位面积 SOC 储量空间格局的影响

从图4可以看出,崇明岛周缘盐沼湿地植被类型与 SOC 含量及单位面积 SOC 储量空间格局存在一定的相关性,SOC 含量和单位面积 SOC 储量与植物地上生物量呈显著正相关 ($P < 0.05$),与植物根部 C/N 呈显著负相关 ($P < 0.05$,图4)。由于海三棱藨草群落的地上生物量显著低于互花米草群落 ($P < 0.05$),芦苇群落的根部 C/N 显著高于互花米草群落 ($P < 0.05$) (表2),因而互花米草群落的 SOC 含量 ($(17.3 \pm 0.3) \text{ g/kg}$) 和单位面积 SOC 储量 ($(82.52 \pm 0.4) \text{ Mg C/hm}^2$) 均显著高于芦苇 ($(6.2 \pm 2.1) \text{ g/kg}$ 和 $(58.57 \pm 11.37) \text{ Mg C/hm}^2$) 和海三棱藨草群落 ($(6.0 \pm 2.7) \text{ g/kg}$ 和 $(60.12 \pm 27.96) \text{ Mg C/hm}^2$) ($P < 0.05$,图5)。在空间格局上也表现出崇明岛北部生长互花米草群落区域的平均 SOC 含量大于芦苇群落和海三棱藨草群落。

2.3 盐沼湿地土壤理化特征对 SOC 含量及单位面积 SOC 储量空间格局的影响

从表2可以看出,崇明岛周缘不同样线的盐沼湿地土壤理化特征(0—10 cm)之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。相关性分析结果表明,SOC 含量与土壤盐度、土壤 C/N 呈显著正相关,与土壤容重呈显著负相关,且各环境因素之间存在相互作用(图4)。从图2和表2可以看出,崇明岛东北侧样线的土壤盐度高于西南侧样线,南1和西1样线土壤盐度、土壤 C/N 均相对较低(表2),因此同样是芦苇群落,在土壤理化因子的影响下,南1和西1样线芦苇群落的 SOC 含量(0—10 cm)和单位面积 SOC 储量低于其他样线。同样,对于海三棱藨草群落,土壤 C/N 在东1、2样线较高,东3样线较低,南1、3样线较高(表2),海三棱藨草群落在 0—10 cm 处

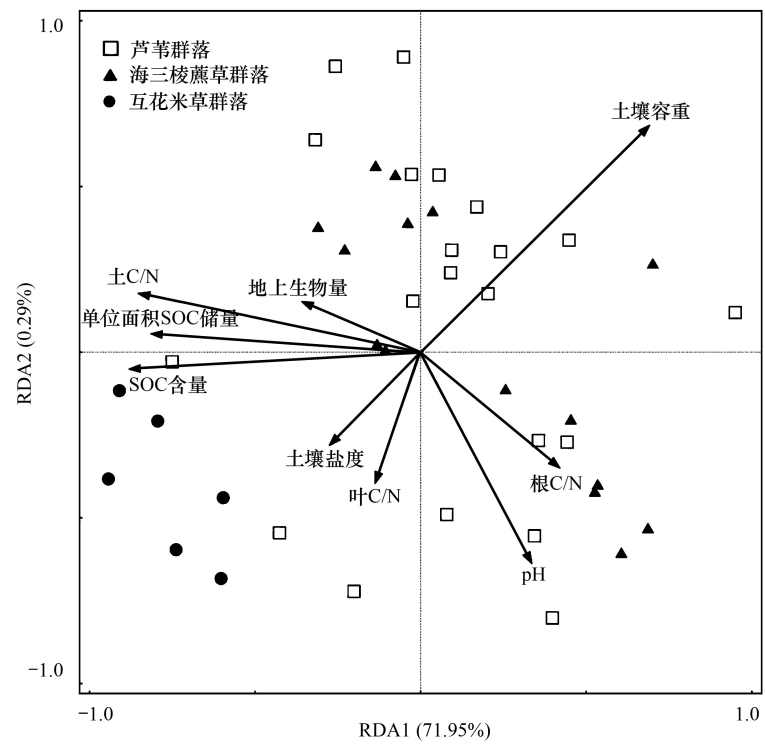


图3 崇明岛周围盐沼湿地 0—10 cm 深度的 SOC 储量与环境因子的冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) of SOC storage and environmental factors at 0—10 cm depth in salt marshes around Chongming Island
C/N: 碳氮比 carbon/nitrogen

SOC 含量和单位面积 SOC 储量自东向南表现出高一低一高的空间格局。

表 2 崇明岛周围盐沼湿地的植物特性和 0—10 cm 深度的土壤理化特征

Table 2 Plant characteristics and soil physicochemical factors at 0—10 cm depth in salt marsh wetlands around Chongming Island

样线编号 Line transects	植物类型 Vegetation types	电导率 Electric conductivity/ (ms/m)	pH	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	土壤 C/N Soil C/N/%	STN 含量 STN content/ (g/kg)	叶 C/N Leaf C/N/%	根 C/N Root C/N/%	地上生物量 Aboveground biomass/ (kg/m ²)
北 1 North 1	芦苇	134.33±2.85	7.67±0.04	1.13±0.02	10.74±0.69	0.95±0.01	20.66±1.07	46.15±7.19	2.77±0.55
北 2 North 2	互花米草	568.33±331.4	7.92±0.31	0.66±0.04	11.86±1.24	1.26±0.39	29.68±2.09	47.48±4.14	2.18±0.65
北 3 North 3	互花米草	375.00±3.61	7.92±0.28	0.66±0.03	12.72±1.02	1.77±0.38	41.43±1.25	54.64±4.7	2.33±0.5
东 1 East 1	海三棱藨草	422.67±18.55	7.70±0.06	1.16±0.012	9.98±0.51	0.95±0.04	22.77±0.73	38.57±2.29	0.60±0.08
东 2 East2	芦苇	354.67±1.86	7.34±0.03	1.11±0.086	9.24±0.62	0.65±0.1	26.01±2.31	77.00±12.27	1.70±0.3
	海三棱藨草	379.30±2.4	7.83±0.01	1.02±0.004	10.45±0.06	0.63±0.08	32.78±2.11	50.81±0.09	0.67±0.03
东 3 East 3	芦苇	317.00±19.28	8.24±0.04	0.93±0.023	9.29±0.21	0.80±0.05	28.77±2.16	66.54±7.26	1.62±0.34
	海三棱藨草	461.33±12.73	8.39±0.04	1.06±0.007	7.00±0.34	0.29±0.03	36.55±1.12	65.05±5.77	0.42±0.15
南 1 South 1	芦苇	110.33±2.9	8.25±0.05	1.05±0.006	9.47±0.12	0.35±0.02	21.8±1.19	52.61±4.08	1.83±0.92
	海三棱藨草	102.00±3.06	8.42±0.08	1.19±0.106	9.20±0.31	0.32±0.02	29.74±2.06	49.51±4.23	0.31±0.02
南 2 South 2	芦苇	112.00±2.08	7.70±0.13	0.71±0.009	12.00±0.6	1.07±0.19	20.97±1.93	56.97±14.26	2.00±0.66
南 3 South 3	芦苇	95.33±1.2	7.60±0.04	1.17±0.003	11.68±0.98	0.56±0.03	21.55±0.13	54.58±4.91	2.17±0.15
	海三棱藨草	90.67±0.67	7.38±0.03	1.14±0.028	12.12±0.53	0.53±0.04	39.48±4.81	54.81±1.09	0.54±0.08
西 1 West 1	芦苇	92.67±5.55	7.50±0.04	1.23±0.006	8.71±1.49	0.19±0.04	22.16±1.46	81.57±2.04	2.28±0.35

C/N: 碳氮比 carbon/nitrogen; STN: 土壤总氮 soil total nitrogen

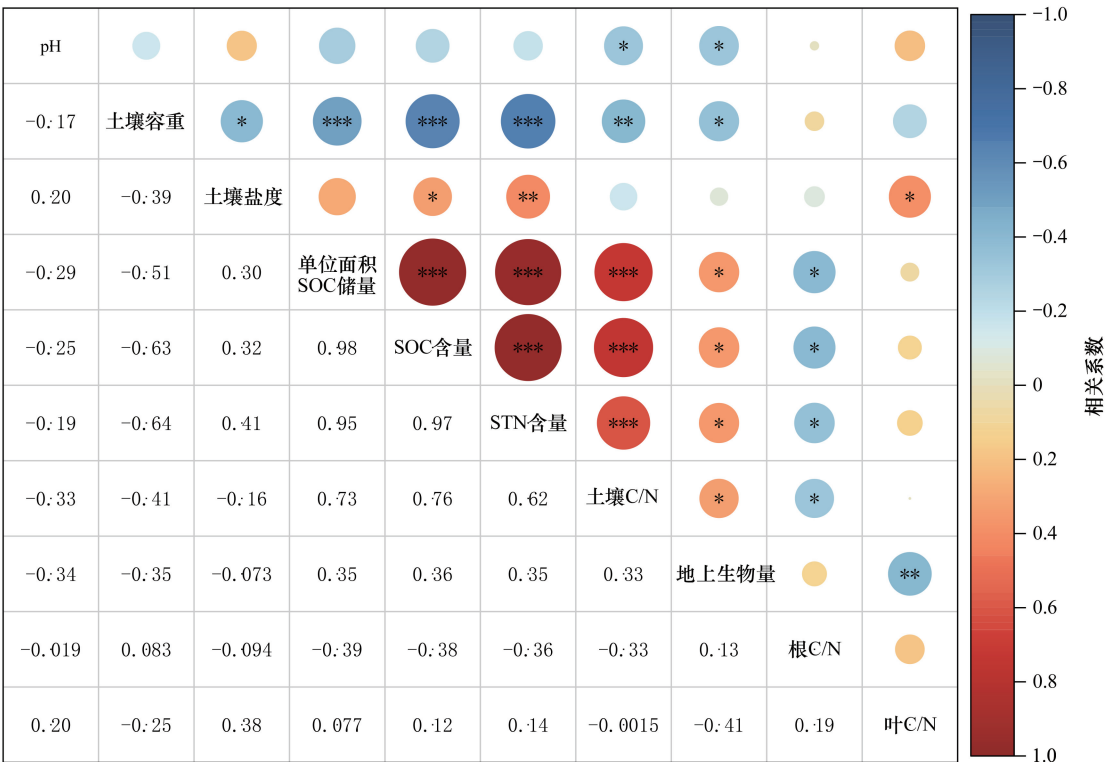


图 4 崇明岛周缘盐沼湿地 0—10 cm 深度 SOC 含量与环境因子的 Pearson 相关性分析

Fig.4 Pearson correlation analysis between SOC content at 0—10 cm depth and environmental factors in salt marsh wetlands around Chongming Island

STN:土壤总氮 soil total nitrogen; * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$

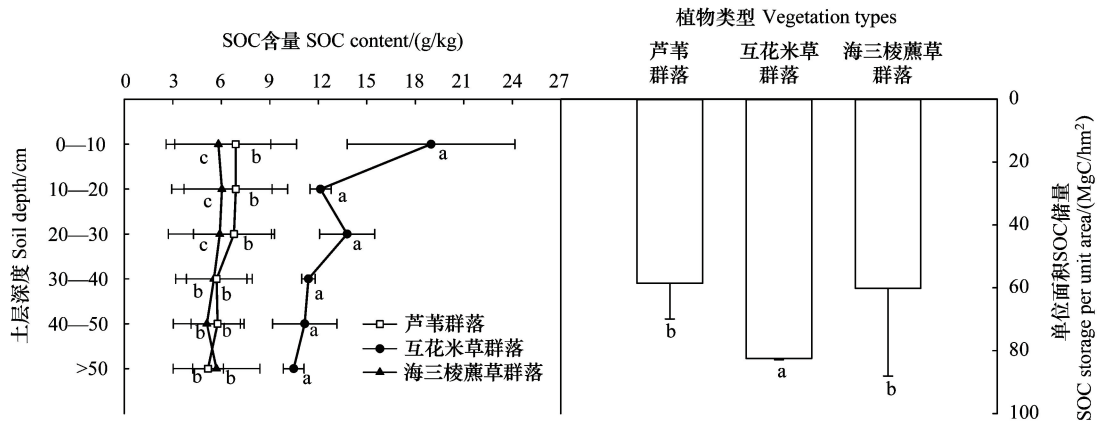


图 5 0—100 cm 深度下崇明岛周缘盐沼湿地主要植物群落的 SOC 含量和单位面积 SOC 储量

Fig.5 SOC content and SOC storage per unit area of main plant communities in salt marshes around Chongming Island at 0—100 cm depth

不同小写字母表示在同一土层深度不同植物群落间的显著差异 ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 崇明岛周缘盐沼湿地 SOC 储量的空间格局分析

研究表明,区域尺度的土壤储碳能力受到水文、植物、土壤等多种因素的共同调节^[23, 26—28]。SOC 积累通

常被认为是由于较高的初级生产量和较少的分解,以及具有高耐腐蚀性化学残基的输入^[29]。植物碳输入和外源沉积物淤积是 SOC 储量增加的直接来源^[23]。其中,植物主要通过初级生产力、有机质输入和有机质质量来影响 SOC 含量^[28]。植物向土壤中提供不同数量的碳输入,碳输入的数量和质量受到植被类型的强烈影响^[30],碳输入的质量(如 C/N 和木质素等)可以通过影响微生物对 SOC 的利用,进一步影响了土壤有机碳库的储存、分布和分解^[22]。植物群落还会随盐沼湿地滩面高程变化发生演替,从而也会影响其碳输入和捕获沉积物的能力^[31]。已有的研究表明,互花米草作为一种 C4 盐沼植物,具有较高的净初级生产力,因而其生物量和 SOC 储量均高于本地物种^[31],其 SOC 埋藏率也是本地植物的 2.63—8.78 倍^[29]。互花米草通过促进 SOC 积累,改变河口湿地土壤盐度、养分、凋落物质量和微生物群落来影响 SOC 循环^[33]。

外源沉积物淤积则主要通过增加有机质输入、掩埋生长在土壤表面的大型植物和微生物区系中的有机物来增强碳固存^[34]。由于盐沼湿地的土壤沉积速度较快,土壤和土壤碳积累速率明显较高,滨海湿地中沉积物不断增加并被埋藏到更深的土层,客观上不利于有机质的降解,因而这些沉积物中的碳能够在百年到上万年尺度上处于稳定状态而不会释放回大气中,从而实现稳定持续的储碳^[8]。

本研究结果表明,东北侧盐沼湿地单位面积内的平均 SOC 储量高于西南侧区域,互花米草群落的 SOC 含量和单位面积 SOC 储量均显著高于芦苇和海三棱藨草群落。一方面原因是,互花米草作为一种 C4 植物,与本地物种芦苇和海三棱藨草相比,有更高的光合速率、净初级生产力、凋落物产率及捕获沉积物的能力,这些优势植物生理特征改变了植物对土壤的碳输入^[35];同时互花米草凋落物具有较高的 C/N,具有抗腐性^[36],其发达的地下生物量以及位于更湿润的环境中,均减缓了 SOC 分解缓慢^[29],从而有助于 SOC 储量增加。互花米草目前主要分布在崇明岛的东侧和北侧,这也有助于东北侧盐沼湿地 SOC 储量的积累。另一方面,受外海进入北支河槽的泥沙输入的影响,且东滩恰处于北支与北港涨潮流分与落潮河流的区域,使东侧和北侧近 30 年来平均淤涨速率大于南侧滩涂且仍在不断淤涨^[37],有利于崇明岛东北侧盐沼湿地中来自外源沉积物的有机碳输入增加。

从垂直变化来看,崇明岛周缘盐沼湿地各样线的 SOC 含量整体上呈随土层深度增加呈逐渐减少的趋势,0—50 cm 的单位面积 SOC 储量大于 50—100 cm,这可能是因为新有机质的输入的影响,刺激了原 SOC 的矿化,甚至导致土壤深层碳的减少^[25]。在 0—30 cm 深度,崇明岛芦苇群落的平均 SOC 含量显著高于海三棱藨草群落,一部分是由于海三棱藨草地下根系分布较浅,而芦苇的地上和地下生物量均高于海三棱藨草,初级生产力更高所致。而在 30—100 cm 处两者碳含量和 0—100 cm 深度两者平均 SOC 储量并无显著差异,说明不同植物初级生产力的差异并不能完全解释 SOC 的变化^[29]。虽然初级生产力可以影响土壤中碳的输入,但其对 SOC 储量的影响,特别是对较深层土壤的影响较小^[23]。尽管互花米草群落(北 2、3 样线)在 0—100 cm 深度的平均 SOC 含量和单位面积 SOC 储量并无显著差异,但在 0—10 cm 处差异显著,这主要是因为土壤表层更易受外界环境干扰,腐败的枯枝落叶、局地水文条件或捕获的外源沉积物等均容易造成表层 SOC 含量和储量的差异,而深层 SOC 储量很大程度上取决于土壤中有机质向更深土壤层的转化和运输。

3.2 土壤理化特征的空间异质性对盐沼湿地 SOC 储量及其分布格局的影响

土壤理化性质调节着水、氧气、营养物质和其他资源的供应,进而影响微生物群落对 SOC 的利用以及植物同化和沉积有机碳的积累^[23]。虽然表观上植物碳输入可以调节 SOC 的输入、转化和运输,但最终土壤特性控制了垂直方向 SOC 和微生物代谢的变化^[38]。本研究中,不同样线间的盐沼湿地在 0—10 cm 深度处的 SOC 含量波动较大,并与土壤盐度、土壤 C/N 和地上生物量呈显著正相关,与土壤容重和植物根部 C/N 呈负相关关系。盐度对生态系统碳汇功能的影响直接反映在对微生物过程的影响上,随着土壤含盐量的增加,微生物活性会受到抑制,从而引起微生物数量降低,周转速率较慢^[39],一定范围内盐度增加有利于减慢有机质的分解^[40]。本研究中,崇明岛东侧和北侧湿地位于长江口北支,在地形、径流和潮汐等因素作用下,外海高盐水会随北支涨潮流上溯,盐水入侵使得北支盐度高于南支^[41],因而该区域的土壤盐度相比其他区域也高,在一定程度上促进了其 SOC 增加,表现为崇明岛周缘湿地东侧和北侧的 SOC 储量也较高。有研究表明,氮的有

效性控制了微生物的活性和植物的生长,最终影响了土壤中 SOC 输入的质量和数量,SOC 与 STN 含量之间存在显著正相关关系^[12,42]。土壤 C/N 作为一个重要的土壤化学特性,影响土壤有机质分解程度和 SOC 周转率,土壤 C/N 增加有利于 SOC 积累^[11]。本研究也表明,同样是芦苇群落,但南 1 和西 1 样线的土壤盐度和土壤 C/N 较低,其 SOC 含量也比其他样线低。土壤容重也是影响土壤碳储量的关键因素之一,它反映了土壤结构的压实度和孔隙度^[43],随土壤有机质的损失而增加,与 SOC 含量之间有显著相关性^[44-45]。在本研究中,虽然北 3 样线的 SOC 含量显著高于东 1 样线,但其土壤容重显著低于东 1 样线,最终在 0—100 cm 的单位面积 SOC 储量低于东 1 样线。此外,盐沼湿地中高程变化也会对 SOC 储量产生影响,一方面随着滩涂高程变化,植物群落会发生演替,进而影响碳输入和碳捕获能力;另一方面,滩涂高程变化还会通过影响潮汐扰动频率、盐度、土壤水分等相关指标^[46],进一步直接或间接地影响盐沼湿地的有机碳储存和持留能力^[19]。河口区域 SOC 储存状态通常受多种土壤特性的共同作用,换言之,SOC 储量动态对某一土壤特性的敏感性被其他土壤特性或植物特性的变化所缓冲^[23]。从本研究中也可以看出,尽管海三棱藨草群落在东 3 样线的土壤盐度较高,但其 SOC 含量及单位面积储量低于其他海三棱藨草样线,这是由于其表土结构较密实,泥沙孔隙率较小,属“铁板沙”,不利于表土的碳酸盐和海三棱藨草凋落物残体中的碳输入到更深的土壤或地下水中,形成有机碳储存在土壤中。

SOC 积累的影响因素是复杂多样的,植物生长年限、沉积物沉积时间、碳埋藏速率、有机碳来源以及潮汐扰动等因素均可能对碳储量空间格局产生影响^[6,25,29,33-34]。尤其河口区域径潮流往复,环境多变,因此,在河口区域进行碳储量评估时,需要充分考虑到 SOC 储量的空间异质性及土壤环境、植物特性、沉积条件等因素空间分异对 SOC 储量的影响,以更准确地评估盐沼湿地碳储量。后续研究中也应进一步考虑不同区域碳埋藏速率和有机碳来源等其他因素对土壤碳储量空间格局的影响,以进一步评估对未来盐沼湿地 SOC 储量变化的方向和幅度。

4 结论

盐沼湿地的土壤 SOC 含量和单位面积储量在水文、植被和土壤理化性质等多种因素共同作用下,呈现出明显的空间异质性。对于本研究的崇明岛周缘盐沼湿地而言,总体上北侧和东侧 SOC 储量高于南侧和西侧区域。从垂直分层结果来看,总体上 SOC 含量随土层深度增加逐渐减少,在 0—50 cm 深度比 50—100 cm 深度储存了更多有机碳。增加盐沼湿地碳储存是缓解气候变化的一种有效方法,未来在进行盐沼保护修复时,应同时考虑盐沼储碳空间格局及影响因素,实现盐沼湿地生态修复、生物多样性保护及固碳增汇的多重目标,更好地提升盐沼“蓝碳”的固碳增汇效应,服务我国“双碳”目标。

参考文献 (References):

- [1] World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2020. 2021.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] Macreadie P I, Nielsen D A, Kelleway J J, Atwood T B, Seymour J R, Petrou K, Connolly R M, Thomson A C, Trevathan-Tackett S M, Ralph P J. Can we manage coastal ecosystems to sequester more blue carbon? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(4): 206-213.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] Bradford M A, Wieder W R, Bonan G B, Fierer N, Raymond P A, Crowther T W. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 751-758.
- [6] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, Lynch J C. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1111.
- [7] Serrano O, Lovelock C E, B Atwood T, Macreadie P I, Canto R, Phinn S, Arias-Ortiz A, Bai L, Baldock J, Bedulli C, Carnell P, Connolly R M, Donaldson P, Esteban A, Ewers Lewis C J, Eyre B D, Hayes M A, Horwitz P, Hutley L B, Kavazos C R J, Kelleway J J, Kendrick G A, Kilminster K, Lafratta A, Lee S, Lavery P S, Maher D T, Marbà N, Masque P, Mateo M A, Mount R, Ralph P J, Roelfsema C, Rozaimi M,

- Ruhon R, Salinas C, Samper-Villarreal J, Sanderman J, J Sanders C, Santos I, Sharples C, Steven A D L, Cannard T, Trevathan-Tackett S M, Duarte C M. Australian vegetated coastal ecosystems as global hotspots for climate change mitigation. *Nature Communications*, 2019, 10: 4313.
- [8] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 刘纪化. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 241-251.
- [9] Pendleton L, Donato D C, Murray B C, Crooks S, Jenkins W A, Sifleet S, Craft C, Fourqurean J W, Kauffman J B, Marbà N, Megonigal P, Pidgeon E, Herr D, Gordon D, Baldera A. Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS One*, 2012, 7(9): e43542.
- [10] Kang X, Yan L, Zhang X D, Li Y, Tian D S, Peng C, Wu H D, Wang J Z, Zhong L. Modeling gross primary production of a typical coastal wetland in China using MODIS time series and CO₂ eddy flux tower data. *Remote Sens*, 2018, 10: 708.
- [11] Zhao Q Q, Bai J H, Zhang G L, Jia J, Wang W, Wang X. Effects of water and salinity regulation measures on soil carbon sequestration in coastal wetlands of the Yellow River Delta. *Geoderma*, 2018, 319: 219-229.
- [12] Lu X F, Hou E Q, Guo J Y, Gilliam F S, Li J L, Tang S B, Kuang Y W. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2780-2792.
- [13] Zhang X H, Zhang Z S, Li Z, Li M, Wu H T, Jiang M. Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on soil carbon contents and stability in the Yellow River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145188.
- [14] 李瑾璞, 于秀波, 夏少霞, 赵玮, 王树涛, 许策. 白洋淀湿地地区土壤有机碳密度及储量的空间分布特征. *生态学报*, 2020, 40(24): 8928-8935.
- [15] Xu C, Wong V L, Reef R E. Effect of inundation on greenhouse gas emissions from temperate coastal wetland soils with different vegetation types in southern Australia. *The Science of the Total Environment*, 2021, 763: 142949.
- [16] 乔宇, 何青, 王宪业, 孟翊. 长江口表层沉积物含水量影响因素分析. *泥沙研究*, 2020, 45(1): 29-36.
- [17] 张翰林, 宋科, 施俭, 吴裕, 郑宪清, 何七勇, 李双喜, 张娟琴, 申广荣, 吕卫光. 崇明岛深层土壤有机碳空间分布及碳储存特征分析. *中国农业气象*, 2017, 38(9): 567-573.
- [18] 牛莹, 赵欣怡, 周云轩, 田波, 王利花. 基于 MODIS 的长江口表层水体盐度时空分异. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2019, 49(5): 1486-1495.
- [19] 姜俊彦, 黄星, 李秀珍, 闫中正, 李希之, 丁文慧. 潮滩湿地土壤有机碳储量及其与土壤理化因子的关系——以崇明东滩为例. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(4): 540-547.
- [20] 曹浩冰, 葛振鸣, 祝振昌, 张利权. 崇明东滩盐沼植被扩散格局及其形成机制. *生态学报*, 2014, 34(14): 3944-3952.
- [21] 史宇骁, 李阳, 孟翊, 赵志远, 张婷玉, 王栋, 袁琳. 1989—2020 年长江口九段沙湿地格局演变及影响因素. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2229-2236.
- [22] Yuan L, Ge Z M, Fan X Z, Zhang L Q. Ecosystem-based coastal zone management: a comprehensive assessment of coastal ecosystems in the Yangtze Estuary coastal zone. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 95: 63-71.
- [23] Xia S P, Song Z L, Van Zwieten L, Guo L D, Yu C X, Wang W Q, Li Q, Hartley I P, Yang Y H, Liu H Y, Wang Y D, Ran X B, Liu C Q, Wang H L. Storage, patterns and influencing factors for soil organic carbon in coastal wetlands of China. *Global Change Biology*, 2022, 28(20): 6065-6085.
- [24] 康满萍, 赵成章, 白雪. 苏干湖湿地土壤全盐含量空间异质性及影响因素. *生态学报*, 2021, 41(6): 2282-2291.
- [25] Dong L B, Li J W, Liu Y L, Hai X Y, Li M Y, Wu J Z, Wang X Z, Shangguan Z P, Zhou Z C, Deng L. Forestation delivers significantly more effective results in soil C and N sequestrations than natural succession on badly degraded areas: evidence from the Central Loess Plateau case. *CATENA*, 2022, 208: 105734.
- [26] Spivak A C, Sanderman J, Bowen J L, Canuel E A, Hopkinson C S. Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems. *Nature Geoscience*, 2019, 12(9): 685-692.
- [27] Gao Y, Zhou J, Wang L M, Guo J M, Feng J X, Wu H, Lin G H. Distribution patterns and controlling factors for the soil organic carbon in four mangrove forests of China. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 17: e00575.
- [28] Luo Z K, Feng W T, Luo Y Q, Baldock J, Wang E L. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4430-4439.
- [29] Yuan J J, Ding W X, Liu D Y, Kang H, Freeman C, Xiang J, Lin Y X. Exotic *Spartina alterniflora* invasion alters ecosystem-atmosphere exchange of CH₄ and N₂O and carbon sequestration in a coastal salt marsh in China. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1567-1580.
- [30] 王勇辉, 焦黎. 艾比湖湿地土壤有机碳及储量空间分布特征. *生态学报*, 2016, 36(18): 5893-5901.
- [31] Choi Y, Wang Y, Hsieh Y P, Robinson L. Vegetation succession and carbon sequestration in a coastal wetland in northwest Florida: evidence from carbon isotopes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(2): 311-319.
- [32] Liao C Z, Luo Y Q, Fang C M, Chen J K, Li B. Litter pool sizes, decomposition, and nitrogen dynamics in *Spartina alterniflora*-invaded and native

- coastal marshlands of the Yangtze Estuary. *Oecologia*, 2008, 156(3): 589-600.
- [33] Zhang G L, Bai J H, Zhao Q Q, Jia J, Wang X, Wang W, Wang X Y. Soil carbon storage and carbon sources under different *Spartina alterniflora* invasion periods in a salt marsh ecosystem. *CATENA*, 2021, 196: 104831.
- [34] Connor R F, Chmura G L, Beecher C B. Carbon accumulation in bay of fundy salt marshes; implications for restoration of reclaimed marshes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(4): 943-954.
- [35] Kelleway J J, Cavanaugh K, Rogers K, Feller I C, Ens E, Doughty C, Saintilan N. Review of the ecosystem service implications of mangrove encroachment into salt marshes. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 3967-3983.
- [36] Yang S G, Li J H, Zheng Z, Meng Z. Characterization of *Spartina alterniflora* as feedstock for anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(4): 597-602.
- [37] 马彬彬, 何钰滢, 戴志军. 流域和河口高强度人类活动对崇明岛滩涂资源变化过程的影响. *自然资源学报*, 2022, 37(4): 1025-1035.
- [38] Sun T T, Wang Y G, Hui D F, Jing X, Feng W T. Soil properties rather than climate and ecosystem type control the vertical variations of soil organic carbon, microbial carbon, and microbial quotient. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107905.
- [39] Hu M J, Ren H C, Ren P, Li J B, Wilson B J, Tong C. Response of gaseous carbon emissions to low-level salinity increase in tidal marsh ecosystem of the Min River Estuary, southeastern China. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 52: 210-222.
- [40] Sheng Q, Wang L, Wu J H. Vegetation alters the effects of salinity on greenhouse gas emissions and carbon sequestration in a newly created wetland. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 542-550.
- [41] 李志鹏, 朱建荣. 2007—2016 年北支河势变化对长江口盐水入侵影响数值研究. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2022(3): 109-124.
- [42] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J, Turnbull J, Bowman W D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 2002, 419(6910): 915-917.
- [43] Botula Y D, Nemes A, Van Ranst E, Mafuka P, De Pue J, Cornelis W M. Hierarchical pedotransfer functions to predict bulk density of highly weathered soils in central Africa. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(2): 476-486.
- [44] Bai J, Xiao R, Zhang K, Gao H, Cui B, Liu X. Soil organic carbon as affected by land use in young and old reclaimed regions of a coastal estuary wetland, China. *Soil Use and Management*, 2013, 29(1): 57-64.
- [45] 张婧婷, 石浩, 田汉勤, 逯非, 徐希燕, 刘迪, 刚诚诚, 方善民, 秦小羽, 潘乃青, 王思远. 1981—2019 年华北平原农田土壤有机碳储量的时空变化及影响机制. *生态学报*, 2022, 42(23): 9560-9576.
- [46] 全川, 贾瑞霞, 王维奇, 曾从盛. 闽江口潮汐盐沼湿地土壤碳氮磷的空间变化. *地理研究*, 2010, 29(7): 1203-1213.